

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2012

Emanuel Holub

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Název bakalářské práce

**Omezení nárazového proudu výkonových
transformátorů**

Soft-Start Eguipment for Power Transformer

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Emanuel Holub**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Omezení nárazového proudu výkonových transformátorů.
Soft-Start Equipment for Power Transformer.**

Zásady pro vypracování:

Přechodový děj při zapínání transformátoru, způsoby jeho omezení.
Rozbor funkce komerčních obvodů, používaných ve spotřební a průmyslové elektrotechnice.
Návrh a praktická realizace základních variant obvodu pro omezení nárazového proudu transformátoru ve výrobcích spotřební a průmyslové elektroniky (do výkonu 2kVA při 230V).
Praktická měření účinnosti obvodů.

Seznam doporučené odborné literatury:


Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení autora práce:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



Emanuel Holub

Datum odevzdání bakalářské práce:4.5.2012.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce ing. Petru Bernátovi, Ph.D. za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Abstrakt

Obsahem této práce je rozbor přechodového děje při zapínání transformátoru a způsoby jeho omezení. Rozbor funkce komerčních obvodů používaných ve spotřební a průmyslové elektrotechnice. Návrh a praktická realizace základních variant obvodu pro omezení nárazového proudu transformátoru ve výrobcích spotřební a průmyslové elektroniky (do výkonu 2 kVA při 230 V). Praktické ověření funkce vybraného omezovacího obvodu.

Klíčová slova

Přechodový děj, transformátor, nárazový proud

Abstrakt

The content of this work is to analyze the transition happens when switching transformer means its limitations. Analysis of the commercial function circuits used in consumer and industrial electronics. Design and practical implementation of the basic variants of the circuit to limit inrush current in transformers and industrial products, consumer electronics (up to 2 kVA output at 230 V). The practical test of the selected limiting circuit.

Key words

Transient plot, transformer, inrush current

Seznam použitých symbolů a zkratk

B	T	magnetická indukce
C	F	kapacita
C		integrační konstanta
C _p	JK ⁻¹	tepelná kapacita termistoru
D		dioda
I	A	elektrický proud
i	A	okamžitá hodnota proudu
I ₀	A	fázor magnetizačního proudu
IC		integrovaný obvod
i _C	A	okamžitá hodnota proudu kondenzátoru
I _m	A	maximální hodnota proudu
i _{net}	A	okamžitá hodnota proudu napájecí sítě
IO		integrovaný obvod
I _{tmax}	A	maximální hodnota zapínacího proudu
i _{ust}	A	okamžitá hodnota ustáleného proudu
i _{vp}	A	okamžitá hodnota přechodného proudu
K		integrační konstanta
L	H	indukčnost
L _δ	H	rozptylová indukčnost
N		počet závitů vinutí
P	W	činný výkon
P _K	W	příkon na krátko
R	Ω	elektrický odpor
RE		relé
R _{FE}	Ω	odpor charakterizující činné ztráty v železe
R _{LOAD}	Ω	odpor zátěže
R _S	Ω	odpor spouštěče
R _Z	Ω	odpor zátěže
SW		spínač
T		tranzistor
TE		termistor
TR		transformátor
Tr		triak
U	V	efektivní hodnot elektrického napětí
U ₀	V	napětí na prázdno
u _C	V	okamžitá hodnoty napětí na kondenzátoru
u _i	V	okamžitá hodnota indukovaného napětí
U _K	V	napětí nakrátko
u _L	V	okamžitá hodnoty napětí na indukčnosti
U _m	V	maximální hodnota napětí
U _{ma x}	V	maximální hodnota napětí
U _{net}	V	efektivní hodnota napětí napájecí sítě
u _R	V	okamžitá hodnoty napětí na rezistoru
VYP		vypínač

W_C	W	maximální energie akumulovaná v kondenzátoru
W_L	W	maximální energie akumulovaná v indukčnosti
x_μ	Ω	magnetizační reaktance
x_σ	Ω	rozptylová reaktance
Z	Ω	impedance
Z_C	Ω	impedance kondenzátoru
Z_K	Ω	impedance transformátoru nakrátko
Z_{LOAD}	Ω	impedance zátěže
δ		tlumení
δ	W	výkon vyzářený povrchem
ϑ	K	teplota
λ		kořen charakteristické rovnice
τ	s	časová konstanta
ϕ	Wb	okamžitá hodnota magnetického indukčního toku
Φ_m	Wb	maximální hodnota magnetického indukčního toku
Φ_{max}	Wb	maximální hodnota magnetického indukčního toku
Φ_{nej}	Wb	okamžitá hodnoty nejnepříznivějšího magnetického indukčního toku
Φ_S	Wb	magnetický indukční tok primárního vinutí procházející jádrem transformátoru
Φ_{zb}	Wb	zbytkový magnetický indukční tok
Φ'	Wb	okamžitá hodnota ustáleného indukčního toku
Φ''	Wb	okamžitá hodnota přechodného indukčního toku
φ	rad	fázový posun
ψ	rad	úhel, fázový posun
ω	rad s^{-1}	úhlový kmitočet
ω_0	rad s^{-1}	rezonanční úhlový kmitočet

Obsah

1	Úvod	2
2	Přechodový děj při zapínání transformátoru	3
2.1	Připojení transformátoru naprázdno na síť	3
2.1.1	Teoretická velikost nárazového (zapínacího) proudu	7
2.2	Připojení transformátoru nakrátko na síť	8
3	Způsoby omezení přechodového děje	13
4	Rozbor funkce komerčních obvodů používaných ve spotřební a průmyslové elektrotechnice	14
4.1	Zapojení demagnetizačního kondenzátoru	14
4.2	Prodloužení primárního vinutí (zvětšení činného odporu a rozptylové reaktance vinutí)	15
4.3	Obvod měkkého rozběhu s unipolárním řízením spínacího prvku	15
4.4	Stupňový spouštěč	16
4.5	NTC termistory	17
5	Návrh a praktická realizace základních variant obvodu pro omezení nárazového proudu transformátoru ve výrobcích spotřební a průmyslové elektroniky (do výkonu 2kVA při 230V).	19
5.1	Základní varianty obvodů pro omezení nárazového proudu	19
5.1.1	Přímé připojení termistoru k transformátoru	19
5.1.2	Omezovač nárazového proudu transformátoru pomocí výkonového rezistoru napájený přes snižovací transformátor	19
5.1.3	Omezovač nárazového proudu transformátoru pomocí výkonového termistoru napájený přímo ze sítě	20
6	Praktické ověření funkce vybraného omezovacího obvodu	22
7	Závěr	26
8	Seznam literatury	27

1 Úvod

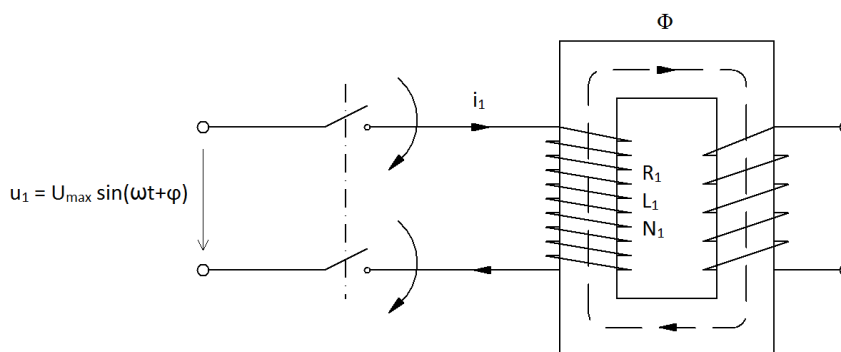
Ve své práci se zabývám především teoretickým rozбором přechodových dějů při zapínání transformátorů napájejících elektronické obvody při provozních stavech naprázdno a nakrátko. Z tohoto rozboru pak vycházejí různé metody omezení tohoto přechodového děje. Ve své podstatě jsou možné pouze tři a to připojení transformátoru ve vhodné fázi napájecího napětí, snížení pracovní indukce a odstranění remanentní indukce. Lze sem také zařadit metodu zvýšení impedance primárního obvodu, která neomezuje přechodový děj, ale pouze snižuje nárazový proud. Dále je zde rozebrána funkce některých komerčních obvodů používaných ve spotřební a průmyslové elektrotechnice. Podrobněji se zabývám omezovacími elektronickými obvody s použitím výkonových rezistorů a termistorů. Porovnání jejich výhod a nevýhod. Pro návrh a realizaci základních variant jsem použil materiál dostupný v odborném časopise a na internetu. Jedná se o elektronické obvody s výkonovými termistory, popř. rezistory napájeny přímo ze sítě nebo přes transformátor. Posledním bodem bylo praktické ověření účinnosti vybraného elektronického obvodu, v tomto případě omezovače nárazového proudu s výkonovým termistorem napájeného přímo ze sítě. Jednalo se o porovnání přechodového proudového děje síťového transformátoru s omezovacím obvodem a bez něj.

2 Přechodový děj při zapínání transformátoru

„Přechodné děje v transformátorech vznikají při každé změně jejich provozních podmínek, při připojení transformátoru na síť, při rychlé změně zatížení, při zkratu v síti, při vlnových dějích ve vedení napájecím transformátor a v řadě dalších případech.“ [1]

2.1 Připojení transformátoru naprázdno na síť

„Posuďme nejprve připojení jednofázového transformátoru na síť. Výstupní vinutí je rozpojeno, transformátor bude po připojení pracovat na prázdko obr. 1.



Obr. 1. Připojení jednofázového transformátoru naprázdno k síti

Proud naprázdno je v ustáleném stavu obvykle malý, činí jen několik procent jmenovitého proudu a pouze u transformátorů malých výkonů může popř. přesáhnout 10%. Při připojení transformátoru na síť však vznikne přechodový děj, během kterého proud na prázdko může být větší než jmenovitý proud.

Při rozboru přechodného děje vyjdeme z napěťové rovnice

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Tato rovnice je nelineární. Při přibližném řešení budeme předpokládat lineární závislost mezi proudem a tokem

$$i_1 = \frac{N_1 \Phi}{L_{11}}, \quad (2)$$

kde L_{11} – indukčnost vstupního vinutí transformátoru. Tato indukčnost není konstantní, mění se, postupně vzrůstá na hodnotu, kterou má při ustáleném stavu. Pro zjednodušení ji však budeme při přibližném řešení považovat za konstantní.

Dosadíme-li (2) do (1) a budeme-li předpokládat, že přiložené napětí je sinusové, dostaneme

$$\frac{R_1}{L_{11}} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1}{N_1} = \frac{U_{1max}}{N_1} \sin(\omega t + \psi), \quad (3)$$

kde ψ – fázový úhel, určující okamžitou hodnotu sinusového napětí v okamžiku připojení transformátoru.

Řešením rovnice (3) dostaneme okamžitou hodnotu toku jako součet dvou složek

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (4)$$

kde Φ' – okamžitá hodnota ustáleného toku (střídavá složka),

Φ'' – okamžitá hodnota přechodného toku (stejnoseměrná složka).

Ustálený magnetický tok

$$\Phi' = \Phi_{max} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi_{max} \cos(\omega t + \psi). \quad (5)$$

Předpokládáme, že fázový posun mezi napětím a proudem (magnetickým tokem) je přibližně $\pi/2$, protože primární vinutí transformátoru tvoří sériovou kombinaci RL prvků, přičemž R je zanedbatelné vůči L.

Hodnotu přechodného toku Φ'' určíme z rovnice

$$\frac{d\Phi''}{dt} + \frac{R_1}{L_{11}} \Phi'' = 0. \quad (6)$$

Partikulární integrál této rovnice

$$\Phi'' = C e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t}. \quad (7)$$

Integrační konstantu C určíme z počátečních podmínek. V okamžiku připojení je magnetický tok Φ roven nule, nebo zbytkovému toku Φ_{zb} , který může v okamžiku připojení transformátoru protékat ve stejném či v opačném směru jako tok Φ , proto v obecném případě pro $t = 0$ vyjdeme z podmínky

$$\Phi' + \Phi'' = -\Phi_{max} \cos \psi + C = \pm \Phi_{zb}, \quad (8)$$

odtud

$$C = \Phi_{max} \cos \psi \pm \Phi_{zb} \quad (9)$$

a v souladu s (7)

$$\Phi'' = (\Phi_{max} \cos \psi \pm \Phi_{zb}) e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t}. \quad (10)$$

Dosadíme-li (5) a (10) do (4), dostaneme

$$\Phi = \Phi_{max} \left[\cos \psi e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t} - \cos(\omega t + \psi) \right] \pm \Phi_{zb} e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t}. \quad (11)$$

Nejlepší podmínky pro připojení transformátoru na síť vzniknou při $\psi = \pi/2$ a $\Phi_{zb} = 0$.

V tomto případě

$$\Phi = -\Phi_{max} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_{max} \sin \omega t, \quad (12)$$

tzn., že od prvního okamžiku vznikne jen ustálený magnetický tok a přechodný děj vůbec nevznikne.

Nejnepříznivější podmínky nastanou, jestliže je transformátor připojen k síti v okamžiku, kdy $\psi = 0$ a tok Φ_{zb} má opačný smysl než tok Φ' . V tomto případě

$$\Phi = \Phi_{max} \left[e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t} - \cos \omega t \right] + \Phi_{zb} e^{-\frac{R_1}{L_{11}} t} \quad (13)$$

Tok Φ dosáhne své největší hodnoty přibližně za půl periody od okamžiku připojení, tj. při $\omega t \approx \pi$. V tomto okamžiku je roven

$$\Phi_{nej} \approx \Phi_{max} \left[1 + e^{-\frac{R_1}{\omega L_{11}} \pi} \right] + \Phi_{zb} e^{-\frac{R_1}{\omega L_{11}} \pi} \quad (14)$$

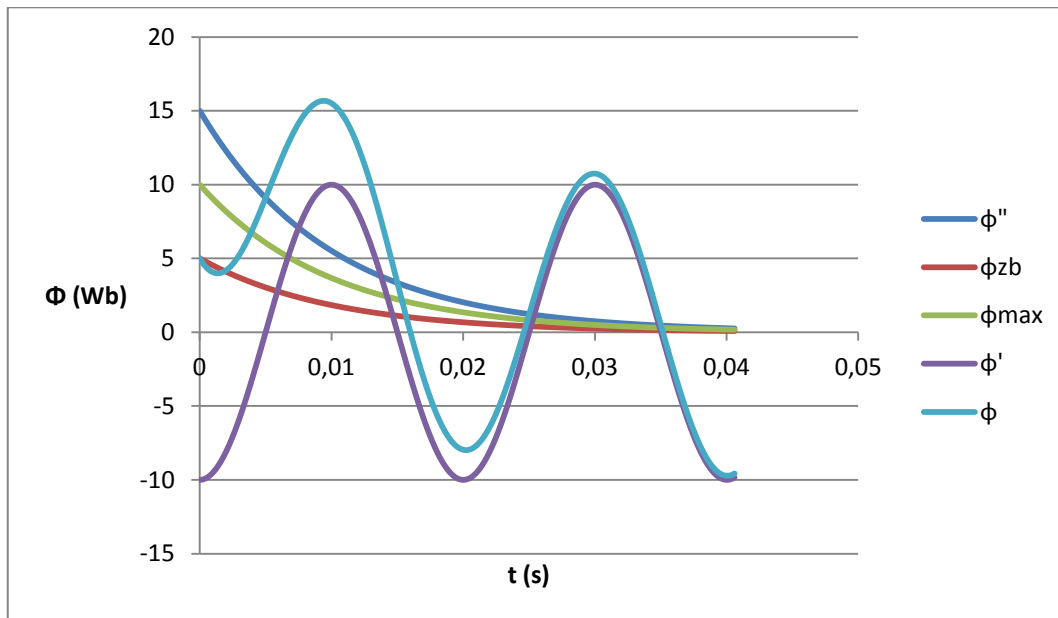
Obvykle je $R_1 \ll \omega L_{11}$, můžeme tedy v prvním přiblížení předpokládat, že $e^{-\frac{R_1}{\omega L_{11}}\pi}$ se bude jen málo lišit od jedné, což platí zejména u velkých transformátorů. Zbytkový tok Φ_{zb} může být velmi značný a v některých případech dosahuje až poloviny hodnoty jmenovitého toku. Položíme-li

$$e^{-\frac{R_1}{\omega L_{11}}\pi} \approx 1 \quad \text{a} \quad \Phi_{zb} \approx \frac{\Phi_{\max}}{2}, \quad (15)$$

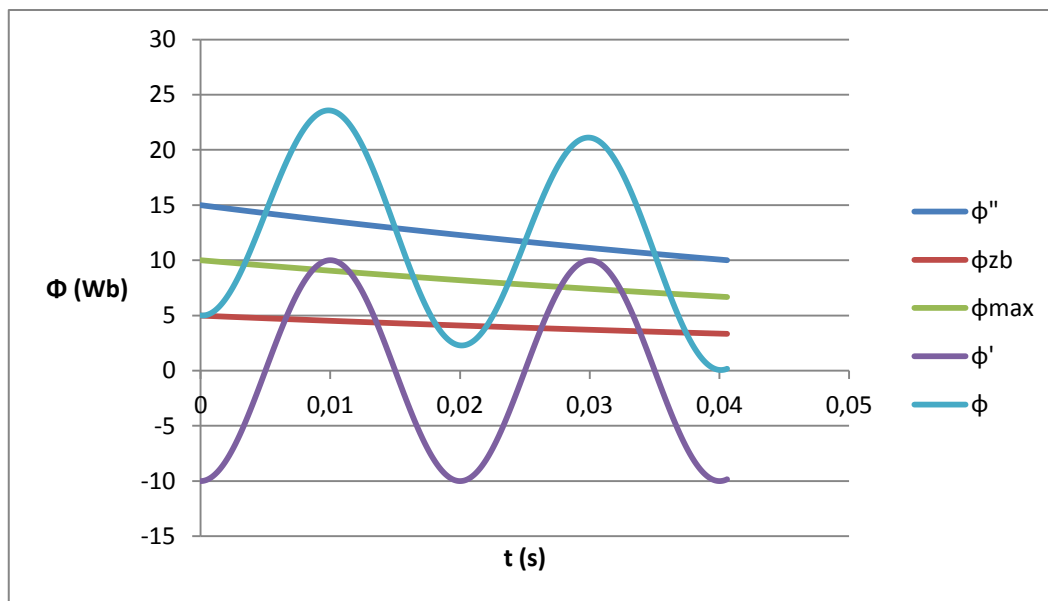
dostaneme

$$\Phi_{nej} \approx 2,5\Phi_{\max} \quad [1] \quad (16)$$

Výše zmíněný text popisuje přechodový děj při zapínání transformátoru naprázdno. Jsou zde řešeny dva mezní případy a to při nejpříznivějších a nejnepříznivějších podmínkách připojení transformátoru. Pro nejpříznivější podmínky by muselo dojít k připojení transformátoru ve chvíli, kdy je napětí na primárním vinutí maximální tj. $\psi = \pi/2$ a zbytkový (remanentní) tok bude nulový, což bude jen v případě, že je transformátor nový a ještě nedošlo k prvotnímu zmagnetování jádra, nebo má předřazen obvod, který jej zbytkového magnetického toku zbaví, i tak ale může dojít k znovu zmagnetování jádra vlivem okolních magnetických polí. Nejnepříznivější podmínky nastanou, jestliže je transformátor připojen k síti v okamžiku, kdy $\psi = 0$ a zbytkový (remanentní) tok má opačný smysl než tok ustálený (střídavá složka). To znamená, že napětí na svorkách vstupního vinutí v okamžiku připojení je nulové a ustálený magnetický tok dosahuje své maximální velikosti (napětí předbíhá magnetický tok přibližně o čtvrt periody $\pi/2$). Vlivem přechodného toku, jenž je tvořen součtem maximálního a zbytkového přechodného toku, který se přičítá k ustálenému toku, vznikne průběh přechodného děje. Magnetický tok nabývá největší hodnoty přibližně za půl periody $\omega t \approx \pi$ jak je patrné z obr. 2 a obr. 3.

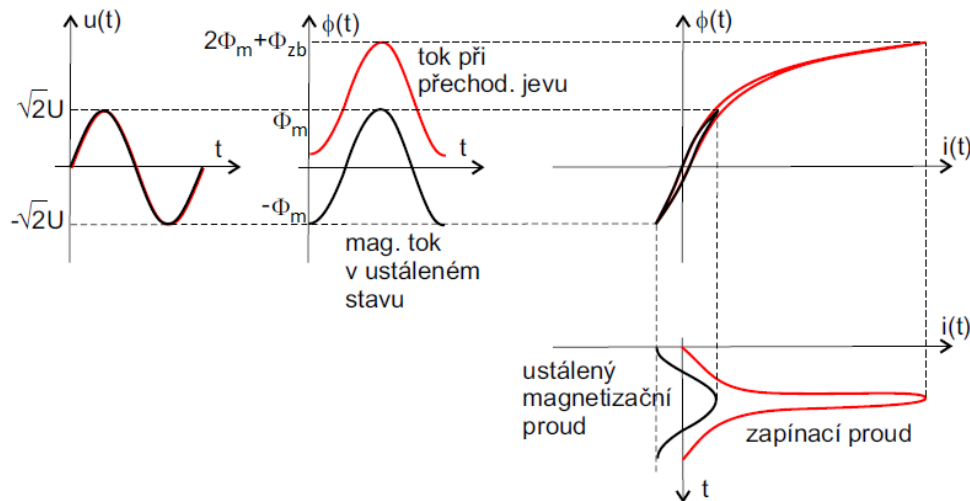


Obr. 2. Průběh magnetického toku při nejnepříznivějším přechodném ději při připojení transformátoru naprázdno k síti podle (14), $\Phi_{\max} = 10$ Wb, $\Phi_{zb} = 5$ Wb, $L_{11} = 1$ mH, $R_1 = 0,1$ Ω



Obr. 3. Průběh magnetického toku při nejnepříznivějším přechodném ději při připojení transformátoru naprázdno k síti podle (14), $\Phi_{\max} = 10 \text{ Wb}$, $\Phi_{zb} = 5 \text{ Wb}$, $L_{11} = 1 \text{ mH}$, $R_1 = 0,01 \Omega$

Porovnáním přechodných průběhů magnetických toků na obr. 2 a obr. 3, je vidět, že při vyšší hodnotě odporu primárního vinutí je tlumení přechodné složky toku ϕ'' větší a nedojde tedy k překmitu o přibližně 2,5 násobek hodnoty maximálního toku Φ_{\max} , jak definuje vztah (16).



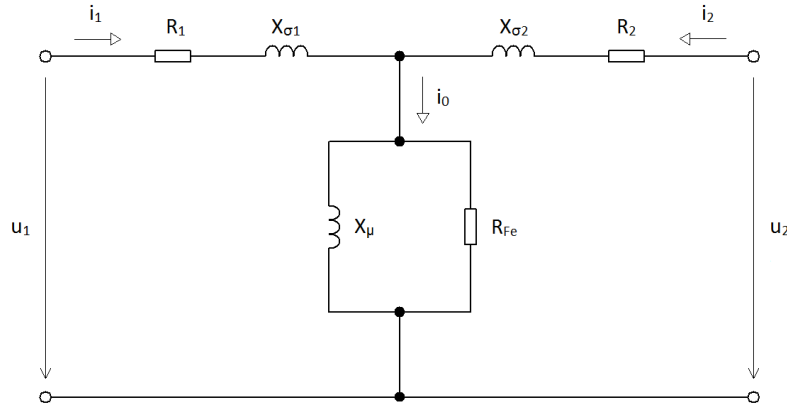
Obr. 4. Vznik nárazového proudu [2]

„Při připojení nasyceného transformátoru může být náraz proudu 100krát i více krát větší než ustálený proud naprázdno.

Se zvětšováním jmenovitého výkonu transformátoru poměr R_1/L_{11} obvykle klesá. Proto u transformátorů malých výkonů probíhá přechodný děj při připojení rychleji a proudový náraz je menší.

U trojfázových transformátorů, kde magnetické toky fází jsou navzájem posunuty o 120° , probíhá přechodný děj v jednotlivých fázích různě. Rovnice (11) však platí pro každou fázi zvlášť.“ [1]

2.1.1 Teoretická velikost nárazového (zapínacího) proudu



Obr. 5. Náhradní schéma transformátoru naprázdno.

„Velikost zapínacího proudu významně ovlivňuje impedance primárního vinutí. V jednoduchém přiblížení budeme uvažovat pouze odpor vinutí. Poměry v jednoduchém sériovém RL tvořeném odporem vinutí a hlavní indukčností transformátoru pak popisuje rovnice

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} = \sqrt{2} U_0 \sin(\omega t + \psi), \quad (17)$$

kde úhel ψ je okamžik připojení transformátoru k napájení. Pro jednoduchost budeme uvažovat odpor R a indukčnost L jako konstantní. Počáteční podmínka úlohy je $i(0) = 0$.

Obecné řešení rovnice (17) předpokládáme ve tvaru

$$i_0 = K e^{\lambda t}, \quad (18)$$

kde kořen charakteristické rovnice je $\lambda = -R_1/L_1$, kterou můžeme vyjádřit časovou konstantou

$$\tau = -\frac{1}{\lambda}. \quad (19)$$

Partikulární řešení získáme z podmínek v ustáleném stavu obvodu v $t \rightarrow \infty$

$$R_1 I_0 + j\omega L_0 I_0 = \sqrt{2} U_0 e^{j\psi}, \quad (20)$$

takže

$$I_0 = \frac{\sqrt{2} U_0 e^{j\psi}}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} e^{j(\psi - \varphi)}. \quad (21)$$

Kde impedance Z a φ bude

$$Z = \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}; \quad \varphi = \arctan \frac{\omega L_1}{R_1}. \quad (19)$$

Přepsáním rovnice (21) z fázorového vyjádření do časového získáme partikulární řešení ve tvaru

$$i_p = \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi). \quad (20)$$

Celé řešení tedy

$$i = i_0 + i_p = K e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sqrt{2} U_0}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi). \quad (21)$$

Integrační konstantu K vypočteme z počáteční podmínky

$$0 = K + \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \sin(\psi - \varphi). \quad (22)$$

Proud při přechodovém ději tohoto zjednodušeného obvodu tedy bude

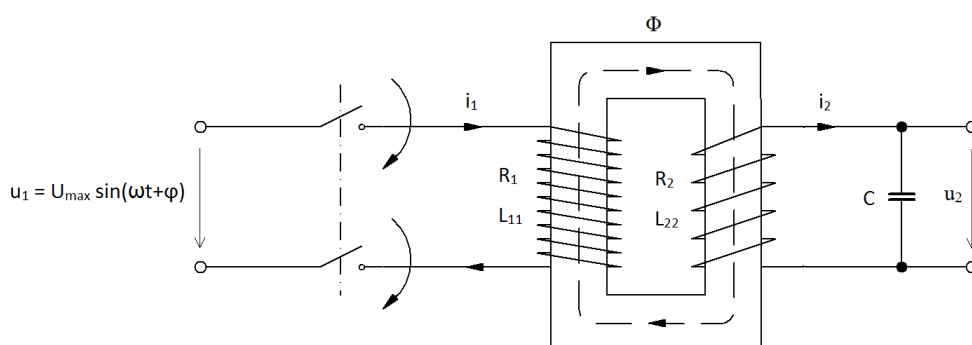
$$i = \frac{\sqrt{2}U_0}{Z} \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \varphi) \right]. \quad (23)$$

Rozborem extrémů funkce (26) zjistíme, že přechodový děj nenastane v případě $\psi = \varphi$ a bude největší při $\psi = \pi/2 - \varphi$.

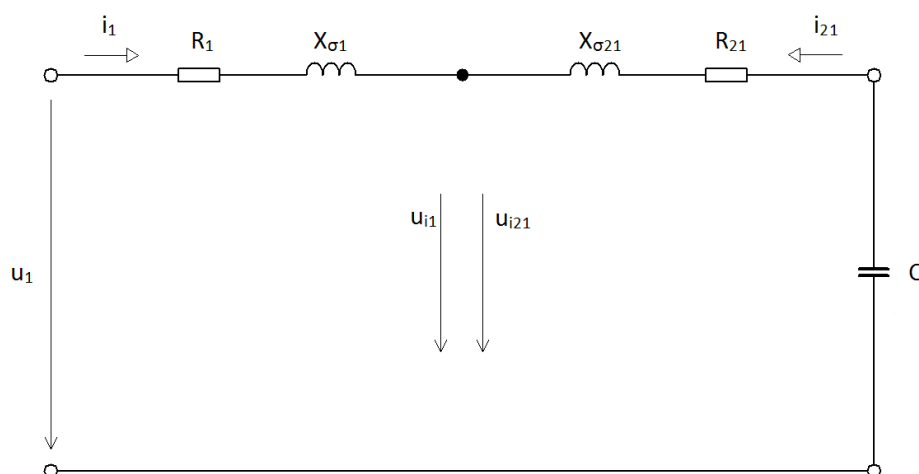
Je zřejmé, že skutečný transformátor nemá konstantní indukčnost L , která výrazně klesá při přesycení jádra. Tuto metodu proto nelze jednoduše použít pro odhad maxima zapínacího proudu. Pro tento případ je nutno uvedené jednoduché přiblížení upravit zavedením funkce $L_1 = L_1(i)$. V tom případě by byl obvod popsán diferenciální rovnicí obdobnou (17), ovšem s nekonstantními koeficienty.“ [2]

2.2 Připojení transformátoru nakrátko na síť

Stav nakrátko zajišťuje vybitý kondenzátor na sekundární straně transformátoru.

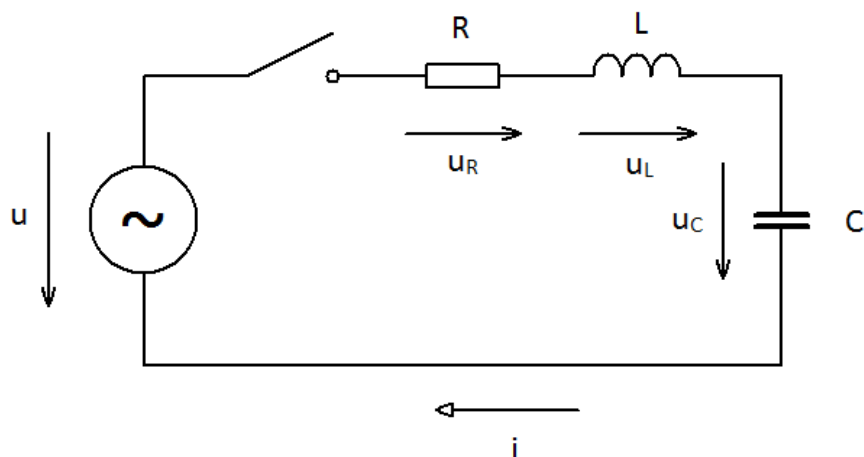


Obr. 6. Připojení jednofázového transformátoru nakrátko k síti



Obr. 7. Náhradní schéma transformátoru nakrátko

Pro matematické řešení nárazového proudu si obvod na obr. 7 zjednodušíme, viz obr. 8.



Obr. 8. Připojení střídavého zdroje na sériový obvod RLC

kde
$$R = R_1 + R_{21}, L = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 21}, L_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{\omega}, L_{\sigma 21} = \frac{X_{\sigma 21}}{\omega}. \quad (24)$$

„Integrodiferenciální rovnice popisující přechodný děj

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = U_m \sin(\omega t + \varphi_u), \quad (25)$$

kde φ_u – fázový úhel, určující okamžitou hodnotu sinusového napětí v okamžiku připojení transformátoru.

Počáteční podmínky jsou nulové

$$i(0_-) = i(0_+) = 0, u_C(0_-) = u_C(0_+) = 0. \quad (29)$$

Lineární obvod implikuje lineární integrodiferenciální rovnici. Možno použít principu superpozice

$$i(t) = i_{ust}(t) + i_{vp}(t). \quad (30)$$

Ustálená složka proudu vyplývá z aplikace symbolického počtu na daný obvod

$$i_{ust}(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (31)$$

kde

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad \varphi_i = \varphi_u - \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (26)$$

Ustálené napětí na kondenzátoru $u_C(t)$

$$u_C(t) = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \varphi_i). \quad (27)$$

Vlastní přechodná složka je řešením homogenní rovnice

$$R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{C} = 0. \quad (28)$$

Charakteristická rovnice

$$\lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = 0. \quad (29)$$

Má kořeny

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (30)$$

kde

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (31)$$

Časový průběh proudu $i(t)$ bude odlišný podle diskriminantu charakteristické rovnice.

Dostaneme tři možné případy:

1. $\delta = \omega_0$
2. $\delta > \omega_0$
3. $\delta < \omega_0$

První dva případy se v praxi vyskytují málo, proto se jimi nebudeme zabývat.

Případ 3. $\delta < \omega_0$, se v praxi vyskytuje nejčastěji. Označíme $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, $\beta = \arctg \frac{\delta}{\omega'}$.
Nejnebezpečnější jevy nastanou pro $\delta \ll \omega'$ a $\beta \doteq 0$.

Mohou nastat tyto případy:

1. $\omega = \omega'$ vzniká isochronismus
2. $\omega \approx \omega'$ vznikají rázy, které jsou tlumené
3. $\omega \ll \omega' \approx \omega_0$ můžou vzniknout značné proudy
4. $\omega \gg \omega' \approx \omega_0$ můžou vzniknout značná přepětí

V našem případě se zajímáme o nárazový proud transformátoru, budeme tedy řešit případ

3. $\omega \ll \omega' \approx \omega_0$.

Nehorší případ nastane při $\varphi_i = 0$

Proud může značně převýšit ustálený proud, a to přibližně ω_0/ω krát.

Proud protékající obvodem

$$i(t) = I_m \left[\sin(\omega t) - \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega' t) e^{-\delta t} \right]. \quad (32)$$

Při $\varphi_i = \frac{\pi}{2}$ proud nepřekročí dvojnásobek amplitudy ustáleného proudu.

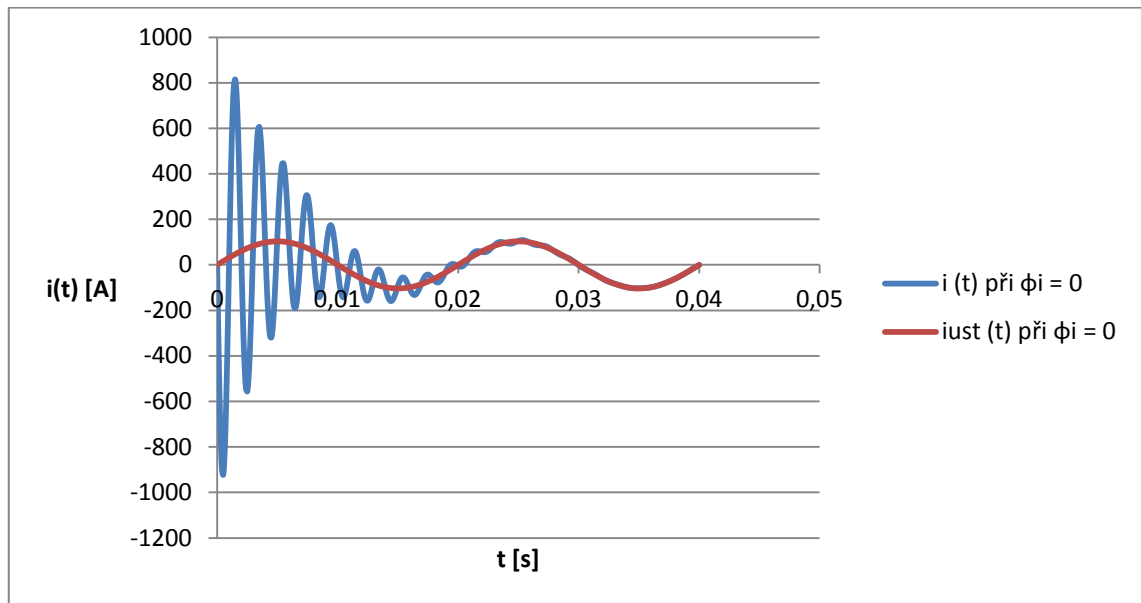
Proud obvodem

$$i(t) = I_m [\cos(\omega t) - \cos(\omega' t) e^{-\delta t}]. \quad [3] \quad (39)$$

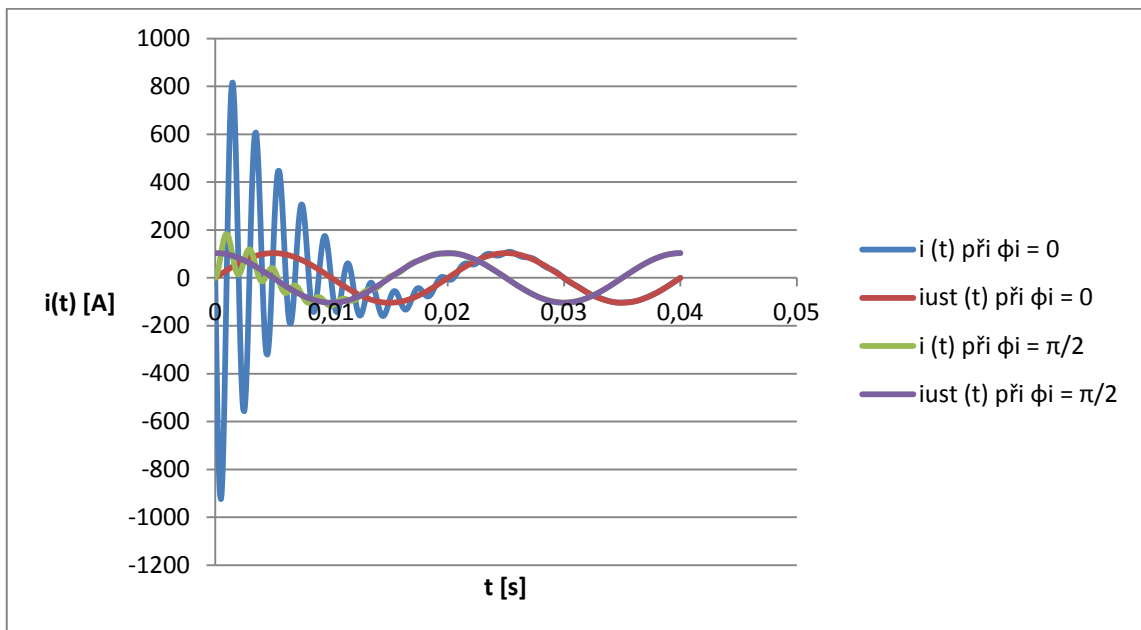
Příklad:

Obvodové parametry:

$$R = 0,04 \, \Omega, L = 0,1 \, \text{mH}, C = 1 \, \text{mF}, U = \sqrt{2} \, 230 \sin(\omega t + \varphi_u)$$

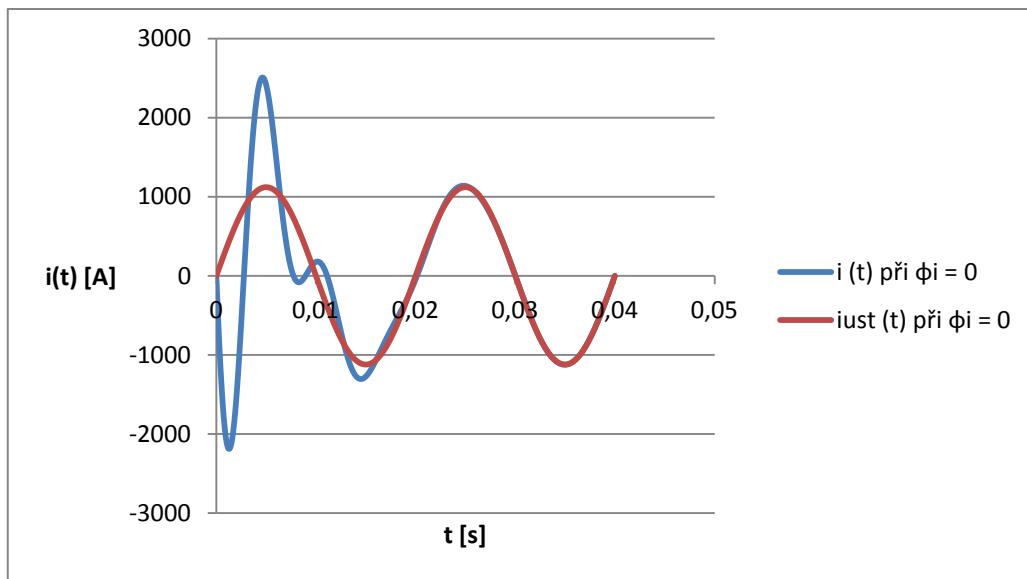


Obr. 9. Průběh proudu obvodem při $\varphi_i = 0$

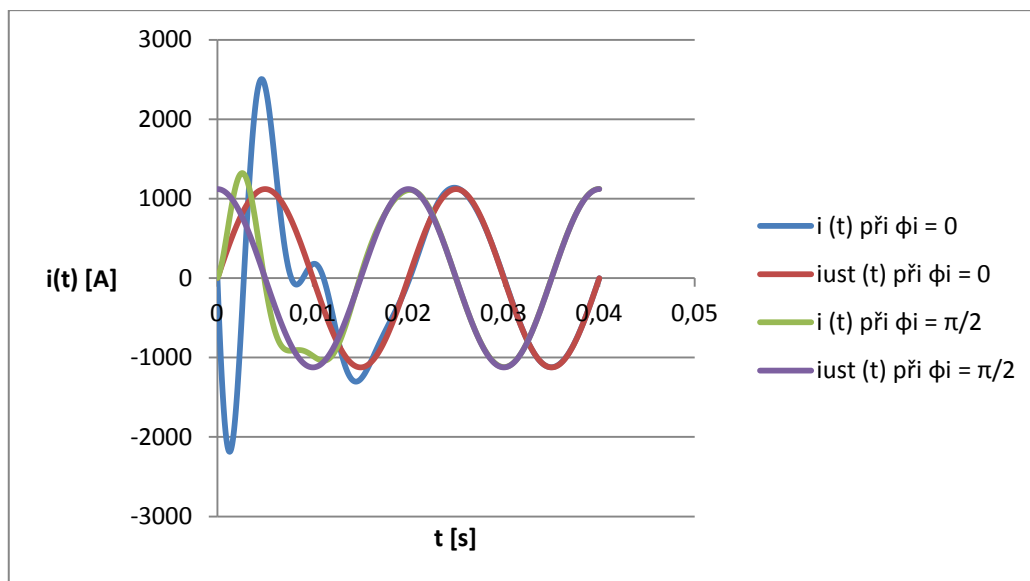


Obr. 10. Porovnání průběhů proudu obvodem při $\varphi_i = 0$ a $\varphi_i = \pi/2$

Průběhy proudů při změně kapacity kondenzátoru na $C = 10 \text{ mF}$. Ostatní hodnoty zůstanou zachovány.



Obr. 11. Průběh proudu obvodem při $\varphi_i = 0$



Obr. 12. Porovnání průběhů proudu obvodem při $\varphi_i = 0$ a $\varphi_i = \pi/2$

Při změně kapacity z hodnoty 1 mF na hodnoty 10 mF se sníží rezonanční úhlová frekvence ω_0 . To má za následek zmenšení nárazového proudu vůči ustálenému proudu, protože velikost nárazového proudu je dána podmínkou ω_0/ω násobek ustáleného proudu. Navíc se při této změně při zachování ostatních parametrů obvodu zvýší ustálený proud obvodem, protože při zvýšení kapacity kondenzátoru se sníží jeho impedance.

Ve chvíli sepnutí kontaktu je transformátor zkratovaný, protože kondenzátor je vybitý a prochází jím zkratový proud, který je pouze omezen impedancí nakrátko transformátoru Z_k a impedancí kondenzátoru Z_c . Jedná se o sériové zapojení rezistoru, cívky a kondenzátoru. Podle parametrů jednotlivých pasivních prvků může mít obvod induktivní, kapacitní nebo rezonanční charakter.

3 Způsoby omezení přechodového děje

Z předešlého rozboru přechodového děje při zapínání transformátoru jsou možné pouze tři způsoby omezení přechodového děje.

- Připojení ve vhodné fázi napájecího napětí
- Snížení pracovní indukce transformátoru
- Odstranění remanentní (zbytkové) indukce
- Zvýšení impedance primárního obvodu

Čtvrtý zmíněný neomezuje přechodový děj, ale snižuje zapínací proud.

„Připojení transformátoru ve vhodné fázi napájecího napětí. Počítáme s nulovou hodnotou stejnosměrné složky magnetického toku Φ'' . K přechodovému ději nedojde, transformátor pracuje okamžitě v ustáleném stavu, a tudíž i zapínací proud je shodný s proudem v ustáleném stavu. Jedná se o nejlepší metodu omezení zapínacího proudu při přechodovém jevu. Tato metoda se však v praxi používá zřídka kvůli své velké technické náročnosti.

Snížení pracovní indukce transformátoru. Tato metoda neovlivní vznik zapínacího proudu, ale zvýší rezervu mezi nejnepríznivějším tokem Φ_{nej} a saturací Φ_s . Tím se omezí velikost zapínacího proudu. Pracovní indukci snížíme zvětšením průřezu jádra a zvýšením počtu závitů vinutí. To má za následek zvýšení impedance, která dále sníží velikost zapínacího proudu. Tyto změny způsobí nárůst ztrát naprázdno i nakrátko, zvětšení a prodražení celého transformátoru. Zvětšení impedance nemá přímo vliv na rozvoj přechodového jevu. Impedance brání nárůstu zapínacího proudu a snižuje elektromotorické napětí a tím pracovní indukci. Impedance primárního vinutí také urychluje odeznívání stejnosměrné složky magnetického toku. Zvětšení impedance ale způsobí zvýšení napětí nakrátko.

Odstranění remanentní indukce má podobný vliv jako snížení pracovní indukce. Vytváří rezervu mezi nejnepríznivějším tokem a saturací jádra. V praxi mohou při použití této metody nastat problémy s dosažením úplného odstranění remanence a se samovolným opětovným zmagnetizováním jádra vlivem slabých okolních polí.

Vřazení sériové impedance (zvýšení impedance primárního obvodu). Impedanci primárního obvodu myslíme odpor a rozptylovou reaktanci vinutí a impedanci zdroje napětí. Zvýšení této impedance neodstraňuje přímo přechodový děj po zapnutí transformátoru. Impedance primárního obvodu přímo omezuje možnou maximální velikost zapínacího proudu.

Při průchodu zapínacího proudu přes impedanci primárního vinutí vzniká na tomto vinutí úbytek, o který se sníží elektromotorické napětí sytící jádro transformátoru. Důsledkem je pokles magnetického toku Φ jádrem. Během přechodového jevu je tedy snížena magnetická indukce B .

Díky snížení elektromotorického napětí není jádro zcela přesyceno, ale uchovává si zbytky indukčnosti. Skutečný zapínací proud je proto menší než hodnota odpovídající impedanci primárního obvodu.

Trvalé zvýšení impedance primárního obvodu zvětší ztráty nakrátko P_k a napětí nakrátko U_k , proto řada metod zvyšuje impedanci primárního obvodu pouze dočasně krátkou dobu po zapnutí transformátoru. Po skončení rozběhu je rozběhová impedance vyřazena, což je příklad stupňovitého spouštěče nebo NTC termistorů.“ [2]

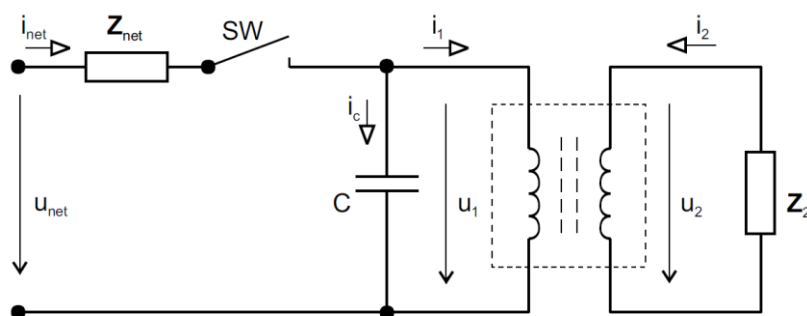
4 Rozbor funkce komerčních obvodů používaných ve spotřební a průmyslové elektrotechnice

Jedná se o tyto základní obvody:

- Zapojení demagnetizačního kondenzátoru
- Prodloužení primárního vinutí
- Obvod měkkého rozběhu s unipolárním řízením spínacího prvku
- Stupňový spouštěč
- NTC termistory
- aj.

4.1 Zapojení demagnetizačního kondenzátoru

„Připojením paralelního kondenzátoru k primárnímu vinutí docílíme odstranění remanentní indukce podle obr. 13. Úlohou kondenzátoru je převzít proud primárního obvodu po vypnutí spínače SW. Energie akumulovaná v LC obvodu tvořeném tímto kondenzátorem a indukčností transformátoru se vybíjí ve formě ztrát, případně odtéká do sekundárního obvodu. Je-li obvod málo zatlumen, vznikají periodické tlumené kmity. V praktických případech je tlumení LC obvodu velké hlavně díky zátěži sekundární strany a obvod nekmitá. Cílem je zvětšit napětovou plochu napětí indukovaného po vypnutí transformátoru a tak snížit indukci v jádře



Obr. 13. Zapojení demagnetizačního kondenzátoru.

Kapacita kondenzátoru se určí z rovnosti energií, které jsou schopny akumulovat transformátor a kondenzátor

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 = W_C = \frac{1}{2}CU^2 \rightarrow C = L \frac{I^2}{U^2}. \quad (40)$$

Větší kapacita kondenzátoru nebude využita a nezlepší potlačení remanence. Eugene Jezierski, 1973 doporučuje velikost kondenzátoru pouze 40 až 50 % z hodnoty dané vztahem (40). Nevýhodou této metody je zátěž sekundárního vinutí transformátoru, která rychle zmaří energii paralelního LC obvodu potřebnou k demagnetování jádra. Demagnetizační kondenzátor je účinný pouze v případě, že transformátor není zatížen. V praxi to může být například transformátor zatížený usměrňovačem s filtračním kondenzátorem.

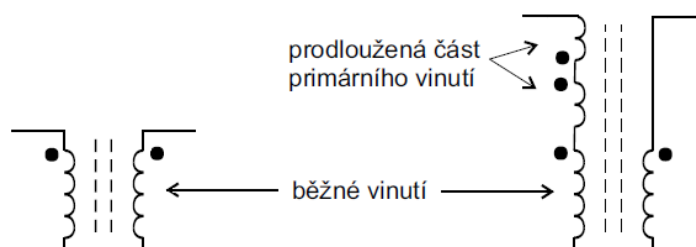
Touto metodou nelze zcela odstranit zapínací proud, ale pouze jeho část vyvolanou remanentní indukci. Navíc je možnost použití limitována charakterem zátěže sekundárního vinutí. Demagnetizační

kondenzátor je proto vhodný pouze u stabilních instalací a musí být řešen s ohledem na zatěžovací obvod.

Výhodou paralelně připojeného kondenzátoru jsou jeho další pozitivní funkce v obvodu. Při rozpojení obvodu převezme proud transformátoru a omezí indukované napětí a šetří tak kontakty spínače. Kondenzátor s hodnotou danou (40) zároveň zcela kompenzuje jalový odběr transformátoru.“[2]

4.2 Prodloužení primárního vinutí (zvětšení činného odporu a rozptylové reaktance vinutí)

„Používaná metoda změny konstrukce vinutí za účelem snížení zapínacího proudu spočívá ve výrazném prodloužení primárního vinutí. Při výrobě se primární cívka vyrobí s větším počtem závitů. Polovina přidaných závitů se navine jako pokračování primárního vinutí a druhá polovina se navine v protisměru, takže zůstane zachován převod transformátoru. Přidaná část vinutí se neuplatní při tvorbě magnetického toku jádrem, ale zvýší pouze odpor a rozptylovou indukčnost vinutí.

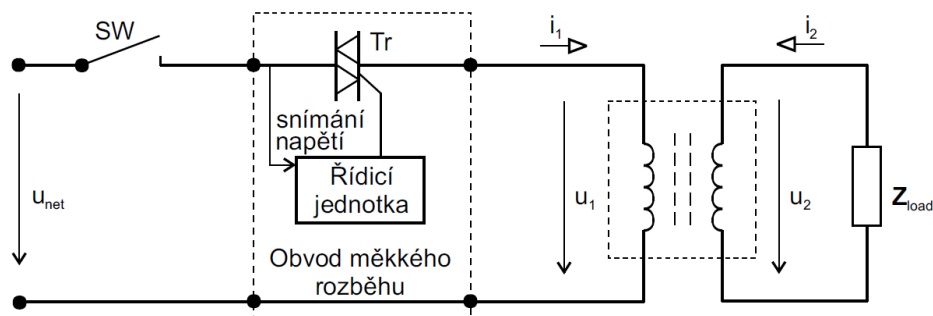


Obr. 14. Schéma prodlouženého vinutí.

Vlivem většího úbytku na primárním vinutí se omezí zapínací proud, a to jak přímo na úbytku vinutí, tak snížením v důsledku poklesu napětí. Snížení maxima zapínacího proudu I_{tmax} není úměrné zvýšení impedance vinutí. Zásah do vinutí zvýší ztráty nakrátko a napětí nakrátko.“ [2]

4.3 Obvod měkkého rozběhu s unipolárním řízením spínacího prvku

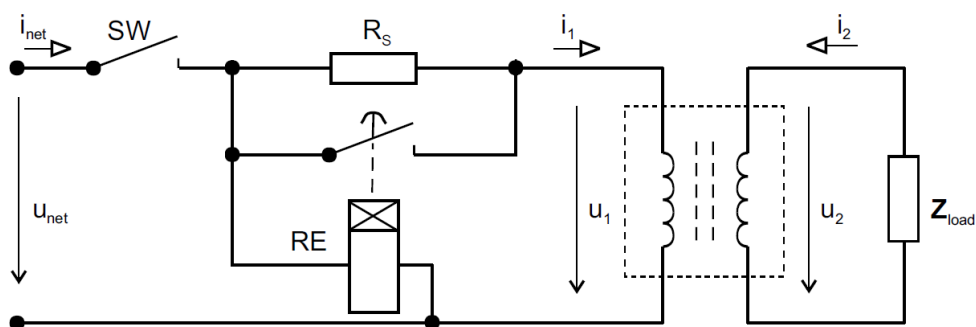
„Transformátor je připojován k napájecí síti rychlým spínacím prvkem, jehož řízení je odvozeno od průběhu napětí v síti. Blokové schéma obvodu a jeho připojení k transformátoru je uvedeno na obr. 15. Obvod měkkého rozběhu klade vysoké nároky na spínací prvek. V jádře transformátoru je akumulované značné množství energie, která při rozpojení obvodu vyvolává vysoká indukovaná napětí. Vhodné je rozpínání obvodu při průchodu proudu I_1 nulou, kdy toto napětí nevznikne. Vhodným spínacím prvkem je triak.“ [2]



Obr. 15. Obvod měkkého spínání transformátoru.

4.4 Stupňový spouštěč

„Stupňový spouštěč je nejběžnější řešení nasazované v praxi při výskytu nežádoucích nadproudů způsobených přechodovým jevem. Transformátor je v první fázi připojen přes sériově zařazený rezistor, který omezuje velikost odbíraného proudu. Po odeznění přechodového jevu je startovací rezistor překlenut kontaktem ovládaným relé se zpožděným přitahem. V tomto okamžiku vznikne další přechodový jev, jehož proudová špička je výrazně menší než zapínací proud transformátoru připojeného přímo k síti.



Obr. 16. Schéma stupňového spouštěče.

Při návrhu zapojení je třeba věnovat patřičnou pozornost velikosti rezistoru spouštěče a nastavení časové konstanty relé.

Volba hodnoty rezistoru je odvislá od charakteru zátěže rozbíhaného transformátoru. Se zvětšující se zátěží vzrůstá riziko vzniku intenzivní proudové špičky způsobené přechodovým jevem po překlenutí rezistoru spouštěče. To je způsobeno malým indukčním tokem v jádře Φ v průběhu rozběhu vlivem úbytku napětí na rezistoru spouštěče.

Vhodným postupem je stanovit maximální velikost zapínacího proudu podle použitého jističe obvodu a volit odpor rezistoru z této hodnoty a z velikosti napájecího napětí. Proud v první fázi spouštění překročí jmenovitý proud transformátoru, přesto je velikost zapínacího proudu kontrolována rezistorem spouštěče. Přechodový jev po překlenutí rezistoru, který již není možno spouštěčem ovlivnit, nebude tak výrazný. Nelze-li přesto dosáhnout potlačení proudové špičky po překlenutí rezistoru spouštěče, tak je možno spouštěč navrhnout jako dvou nebo více stupňový a vyřazovat rezistory spouštěče postupně.

Potřebný výkon rezistoru se určí z napájecího napětí U_{net} , impedance zátěže Z_{load} a odporu spouštěče R_s

$$P = \frac{U_{net}^2}{|Z_{load}| + R_s} - \frac{U_{net}^2 |Z_{load}|}{(|Z_{load}| + R_s)^2} \quad (41)$$

Rezistor spouštěče je zapojen poměrně krátkou dobu řádově v jednotkách sekund, proto je možno výkon rezistoru několikrát zmenšit.

Čas rozběhu se volí podle rychlosti odeznívání přechodového jevu s ohledem na oteplení poddimenzovaného rezistoru spouštěče. Za krátký čas neodezní stejnosměrná složka magnetického toku a může dojít k přesycení transformátoru a vzniku nadproudu po překlenutí rezistoru stupňového spouštěče. Dlouhý čas rozběhu nadměrně tepelně namáhá rezistor spouštěče.

Nevýhodou stupňového spouštěče je velký zastavěný prostor a hmotnost daná především velikostí rezistoru spouštěče. Nezanedbatelné jsou také ztráty, které tvoří příkon cívky stykače. V některých aplikacích může být na závadu dlouhý rozběh se sníženým napětím.“ [2]

4.5 NTC termistory

„Polovodičové termistory NTC jsou tepelně závislé rezistory vyrobené sinatrováním ze směsí oxidů Mn, Ni, Co, Cu a Fe. Odpor termistoru NTC se snižuje s jeho vzrůstající teplotou ϑ . Závislost lze přibližně aproximovat exponenciálou

$$R = R_0 e^{\frac{B(\vartheta_0 - \vartheta)}{\vartheta_0 \vartheta}} \quad (42)$$

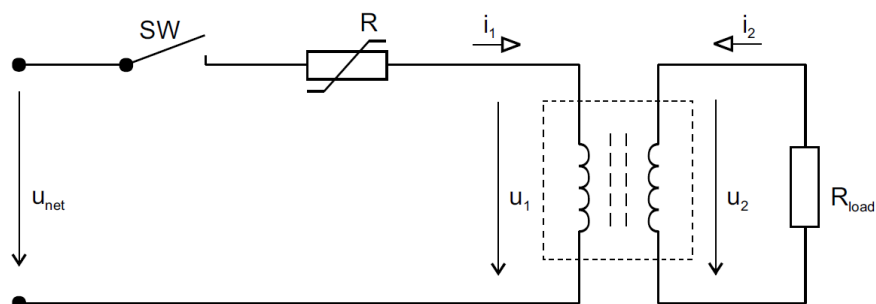
kde R_0 (ϑ_0) je změřený odpor při definované teplotě. Výkonové NTC termistory se používají pro omezení zapínacích proudů. Někteří výrobci označují vhodné NTC termistory přímo jako omezovače zapínacího proudu. Termistory se zapojují sériově ke spotřebiči, zapojení s transformátorem je uvedeno na obr. 17.

Po zapnutí obvodu má termistor teplotu okolí a jeho velký odpor omezí zapínací proud. Procházející proud Jouleovým teplem zahřívá termistor a jeho odpor tak klesá. Průchodem jmenovitého proudu se odpor termistoru ustálí na malé hodnotě. Teplotu termistoru je možno určit z dodaného výkonu $i^2 R$ a povrchem odvedeného nebo vyzářeného výkonu $\delta(\vartheta - \vartheta_a)$

$$C_p \frac{d\vartheta}{dt} = i^2 R - \delta(\vartheta - \vartheta_a) \quad (43)$$

kde C_p je tepelná kapacita termistoru.

Z pohledu transformátoru zapojení NTC termistoru do primárního obvodu zvyšuje impedanci primárního obvodu. Velký odpor po zapnutí účinně omezí zapínací proud. Časová konstanta rozběhu se pohybuje v rozmezí od jednotek do stovek sekund v závislosti na velikosti NTC termistoru a aktuální zátěži transformátoru. Nevýhodou je velmi dlouhý rozběh nezátíženého transformátoru.



Obr. 17. NTC termistor v obvodu s transformátorem.

V ustáleném stavu při jmenovité zátěži je odpor NTC termistoru v desetínách ohmu, to je více než stokrát méně než při 25 °C. Ztráty v obvodu jsou tedy minimální a dají se dále snížit tepelnou izolací termistoru tak, aby se snížil činitel rozptylu tepla do okolí δ . Posun pracovního bodu NTC termistoru při nezátíženém transformátoru není výrazný. Termistor je totiž neustále zatížen magnetizačním proudem a navíc pracuje v ploché části své charakteristiky.

Časová konstanta chladnutí je určena tepelnou kapacitou termistoru C_p a činitelem rozptylu tepla do okolí δ .

$$\tau = \frac{C_p}{\delta} \quad (44)$$

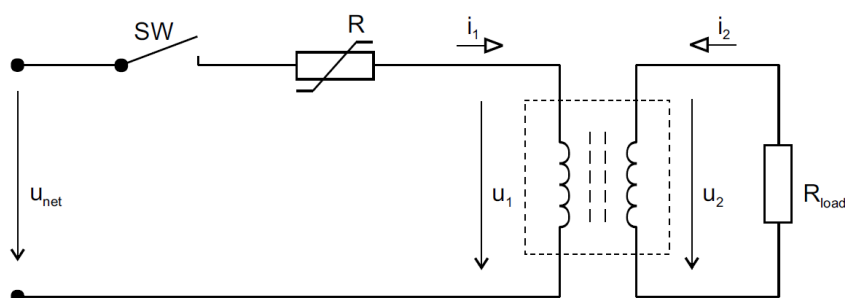
Vážnou nevýhodou je potřeba vychladnutí termistoru před opětovným spuštěním. To vylučuje použití NTC termistorů pro rozběh transformátorů pracujících v přerušovaném provozu.“ [2]

5 Návrh a praktická realizace základních variant obvodu pro omezení nárazového proudu transformátoru ve výrobcích spotřební a průmyslové elektroniky (do výkonu 2kVA při 230V).

„Při zapínání transformátoru dochází k přechodným dějům. Tyto děje mohou způsobit velké nárazové proudy. Navíc bývají často na výstupu připojeny elektrolytické kondenzátory, které ve vybitém stavu představují pro transformátor krátkodobě téměř zkrat. To představuje velké proudové namáhání pro elektronické obvody připojené na tento transformátor. Tomu je třeba zabránit vhodným přídavným obvodem.“ [4]

5.1 Základní varianty obvodů pro omezení nárazového proudu

5.1.1 Přímé připojení termistoru k transformátoru

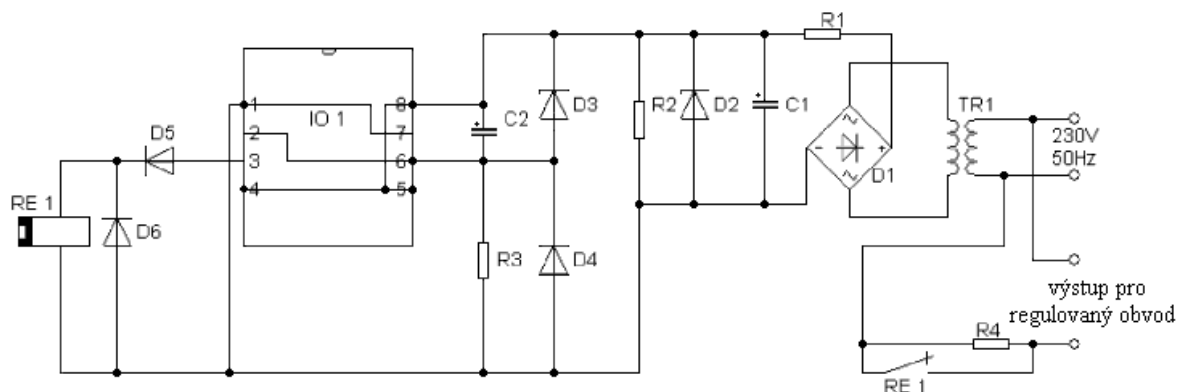


Obr. 18. NTC termistor v obvodu s transformátorem

Výhody a nevýhody tohoto zapojení jsou popsány výše

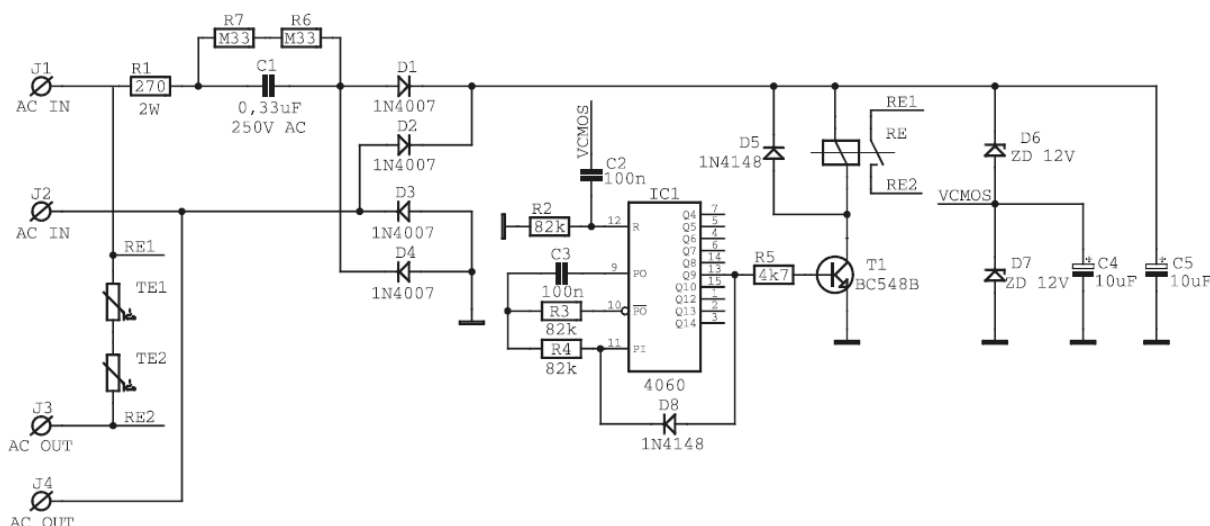
5.1.2 Omezovač nárazového proudu transformátoru pomocí výkonového rezistoru napájený přes snižovací transformátor

„Často se používají pro omezení nárazového proudu obvody s výkonovými rezistory s výkonovou ztrátou 10 až 30 W. Tyto rezistory musí být velké, protože musí vydržet velké nárazové proudy. Rezistor bývá asi po 2 sekundách přemostěn kontaktem relé. Nevýhodou je že při selhání relé nedojde k vyzkratování výkonového rezistoru, který není navržen na trvalý chod a dojde k jeho poškození. Toto může nastat u obvodu omezovače napájeného přes snižovací transformátor. Při nějakém problému na hlavním transformátoru (vadný kondenzátor nebo koncový zesilovač) nemusí být k dispozici dostatečné napětí pro buzení relé. Schéma takového zapojení je na obr. 19. Navíc dojde při překlenutí rezistoru k dalšímu přechodnému jevu, který je sice menší, ale při větším zatížení transformátoru může být pořád dosti velký. To řeší více stupňový spouštěč, který má jednotlivé rezistory vyzkratovány postupně.“ [4]



Obr. 19. Schéma zapojení omezovače nárazového proudu [5]

5.1.3 Omezovač nárazového proudu transformátoru pomocí výkonového termistoru napájený přímo ze sítě



Obr. 20. Schéma zapojení omezovače nárazového proudu [4]

„Výhoda použitých termistoru oproti výkonovým odporům je:

- 1) termistor snese větší nárazový proud,
- 2) v případě selhání relé se termistor nepřepálí a nemůže způsobit žádné škody (odpor může způsobit i požár),
- 3) termistor je menší než výkonový odpor,
- 4) může být nastaven delší čas pro pomalé nabití kondenzátoru.

K bodu 2 je třeba poznamenat, že při nevybavení relé z jakéhokoliv důvodu se výkonové rezistory přepálí, zatím co termistory se pouze zahřejí na snesitelnou teplotu a sníží tím tak svůj odpor pod 1 ohm. Jejich výkonová ztráta tedy nebude větší než hodnota, kterou tyto termistory snesou.

Další výhodou tohoto zapojení je, že je napájeno přímo ze sítě a tudíž nepotřebuje napájecí transformátor. Pro omezení výkonové ztráty je použit svitkový kondenzátor C1. S kapacitou 0,33μF je dostupný proud asi 20 mA. Tento proud je dostatečný pro sepnutí relé. Odpor R1 omezuje nárazový

proud kondenzátorem C1. Odpory R6 a R7 vybíjejí kondenzátor po odpojení od sítě. Diody D6 a D7 omezují napětí pro obvod IC1 a relé.

Pro zpoždění sepnutí relé je použit obvod 4060 – IC1, což je oscilátor s binárním děličem. Je zapojen standardně. RC člen R2 a C2 zajistí reset obvodu. Pokud se objeví na výstupu 9 log.1, pak se pomocí diody D8 zablokuje oscilátor a sepne relé. Zpoždění je nastaveno s uvedenými součástkami na asi na 4 až 5 sekund. Delší zpoždění je lepší než běžně používané 2 sekundy. Velké elektronické kondenzátory se zato odvděčí dlouhou dobou spolehlivého provozu. Toto zapojení je sice složitější, ale používání jednoduchých zapojení s rezistory a kondenzátory je nedostatečné. Při krátkodobém vypnutí je navíc opětovné zapnutí s jednoduchým zapojením téměř okamžité. Obvod 4060 zajistí, že čas pro sepnutí relé bude vždy stejný.“ [4]

Místo výkonových termistorů na obr. 20 mohou být použity i výkonové rezistory. To sebou ovšem nese řadu nevýhod, které již byly popsány výše.

Pro praktické ověření funkce byl použit obvod omezovače, realizovaný ze stavebnice.

Seznam součástek

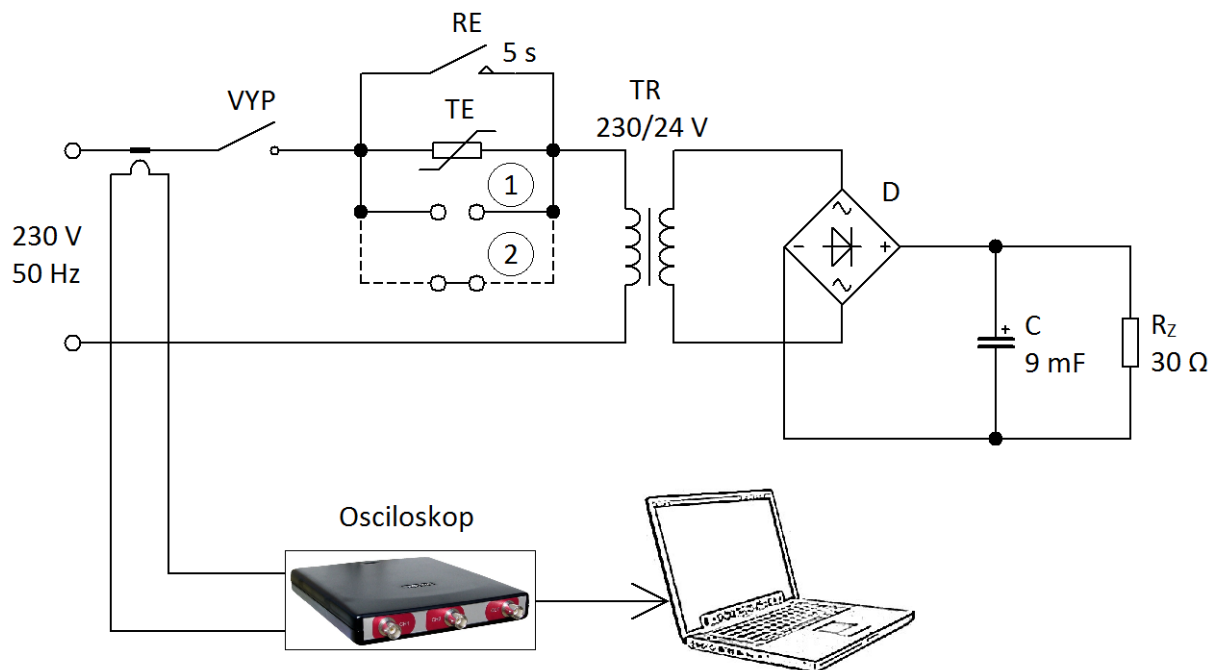
R1	270 Ω /2 W
R2, R3, R4	100 k Ω
R5	2,2 k Ω
R6, R7	330 k Ω
TE1, TE2	termistor 5 Ω /7 A
C1	330 nF/250 V AC
C2, C3	100 nF
C4, C5	10 μ F/50V
IC1	4060
D1 – D4	1N4007
D5, D8	1N4148
D6, D7	ZD 12 V/1,3 W
T1	BC548B

Ostatní

Deska PS
Relé 24V/10 A
2 ks svorka do PS

6 Praktické ověření funkce vybraného omezovacího obvodu

Cílem tohoto měření bylo proměřit průběhy přechodných dějů při připínání síťového transformátoru k síti s použitím omezovače nárazového proudu. Schéma tohoto omezovače je na obr. 20. Omezení nárazového proudu bylo provedeno termistorem (bod 1), poté byl termistor trvale přemostěn (bod 2), jak je znázorněno na obr. 21. V bodě 2 je transformátor připínán přímo k síti bez jakéhokoliv omezení proudu.



Obr. 21. Schéma zapojení měřené úlohy

Použité přístroje

Síťový transformátor JBC E 3250 – 150, 230/24 V, 125 VA

Osciloskop Tie Pie HS3-AWG-100, 100 Ms/s

Reostat R_Z tvořící zátěž, $R = 190 \Omega$, byl nastaven zhruba v 15 % dráhy, takže odpor činil přibližně 30Ω

Notebook

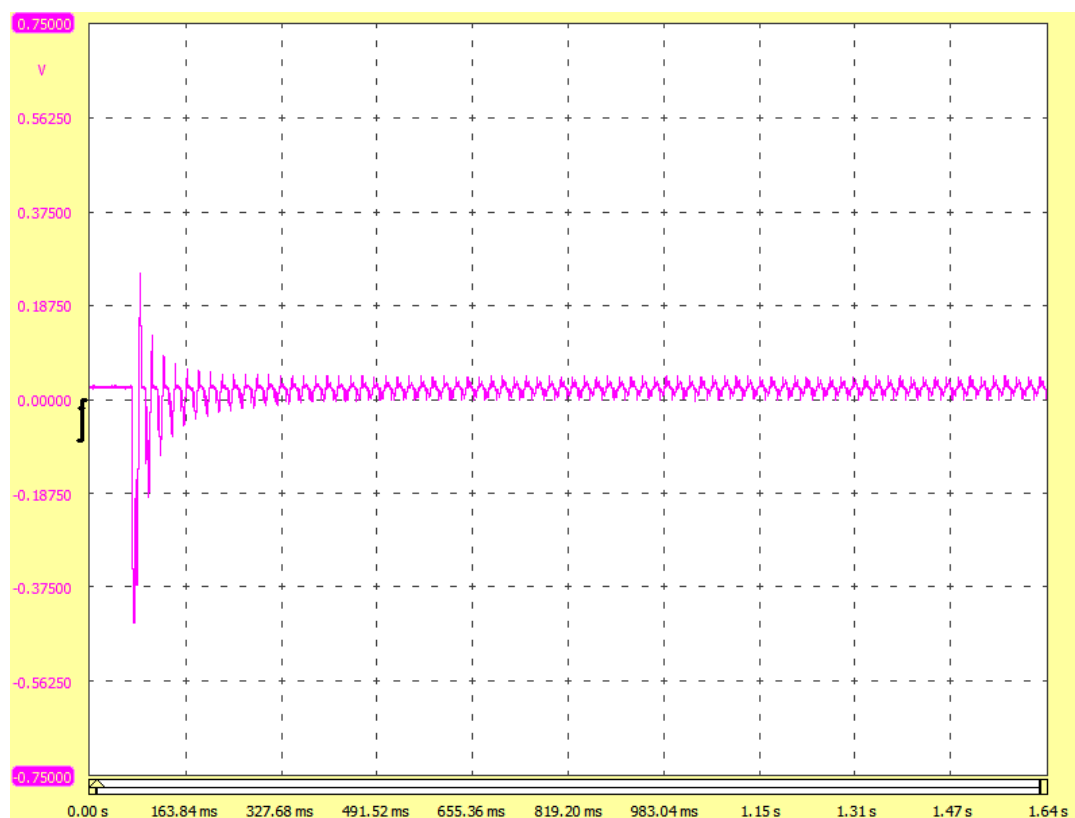
Postup měření

Obvod zapojíme podle obr. 21, kde termistor TE a kontakt relé RE tvoří silovou část omezovače proudu.

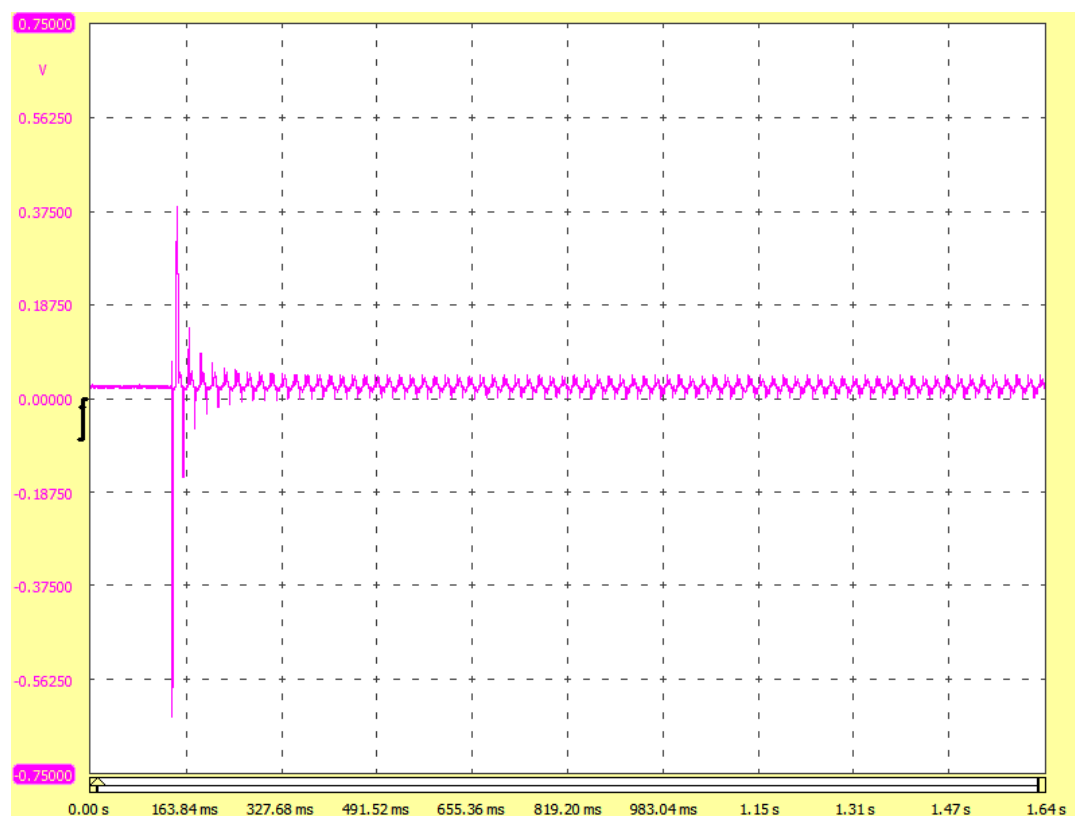
Nejprve provedeme měření s omezovačem nárazového proudu (bod 1 na obr. 21) a po sepnutí vypínače změříme průběh přechodného děje proudu.

Poté termistor TE trvale přemostíme, což simuluje přímé připojení transformátoru k síti (bod 2 na obr. 21) a měření budeme opakovat. Toto měření provedeme se zátěží i bez zátěže.

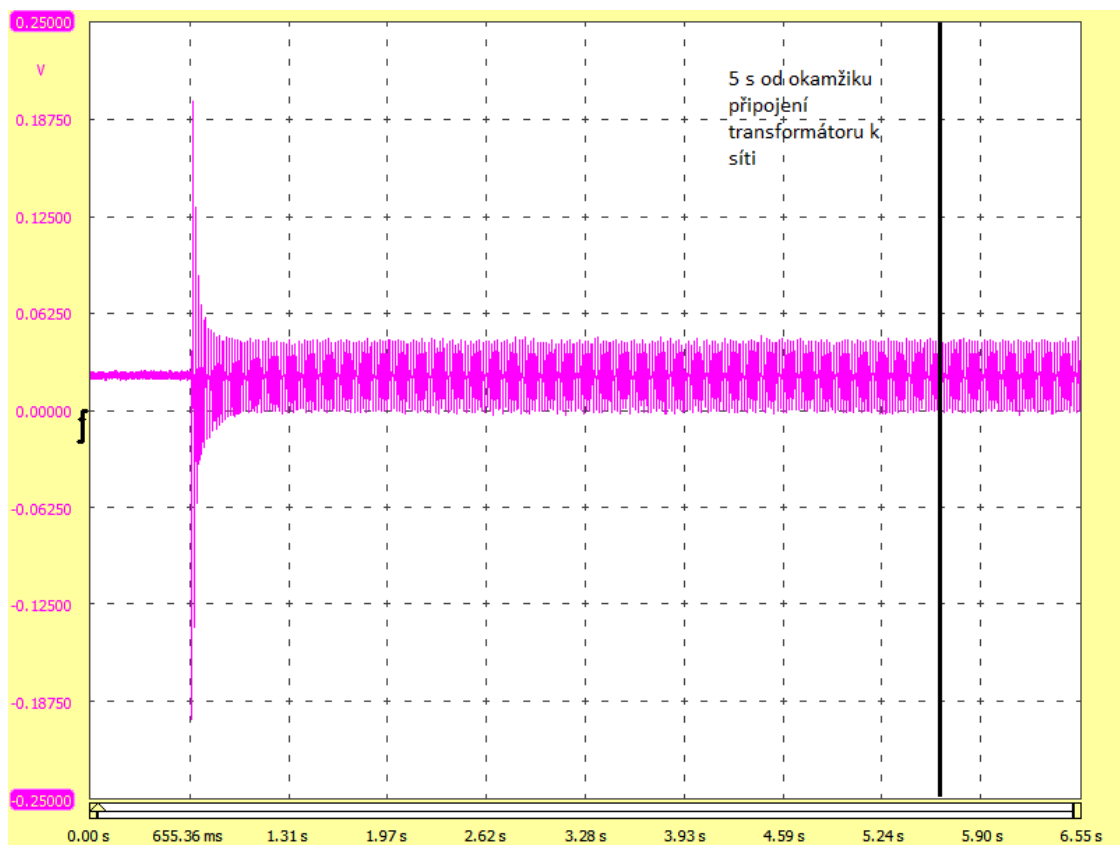
Naměřené průběhy osciloskopem



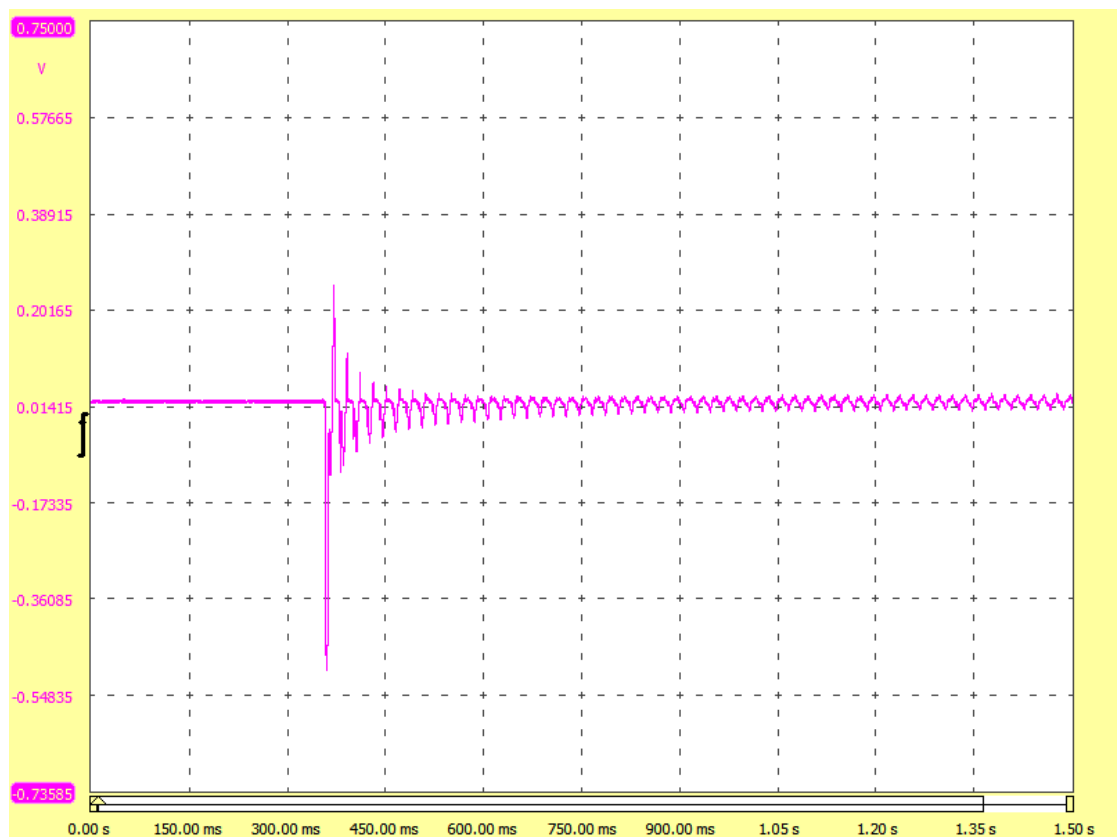
Obr. 22. Přechodový děj omezený omezovačem nárazového proudu



Obr. 23. Ke srovnání – odpovídající průběh proudu při přímém připojení transformátoru k síti



Obr. 24. Okamžik přemostění termistoru kontaktem relé



Obr. 25. Přímé připojení transformátoru k síti bez zátěže

Zhodnocení naměřených průběhů

I přes nejistý okamžik sepnutí je z průběhů na obr. 22 a 23 zřetelné omezení proudového nárazu. Jsou zde také vidět periodicky se opakující špičky, jsou to proudové špičky nabíjení kondenzátoru ve zdroji.

Na obr. 24 je vidět, že v důsledku omezovací schopnosti termistoru dosáhl transformátor ustáleného chodu před dobou přemostění termistoru kontaktem relé, která je vnitřní strukturou omezovače nastavena na 5 s. Druhý přechodový děj již není patrný.

Při měření přechodového děje transformátoru bez zátěže na obr. 25 je zřejmé, že po nabití kondenzátoru ve zdroji nejsou dále na průběhu vidět nabíjecí špičky.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit si ucelený pohled na problematiku připínání jednofázových transformátorů k síti, zejména vzniku přechodového děje a sním souvisejícího nárazového proudu a jeho způsobu omezení. Touto problematikou se již v minulosti zabývala spousta autorů, kteří došli ke stejným nebo alespoň obdobným závěrům.

V práci G. N. Petrova, 1980 [1], z které jsem čerpal, je matematicky popsán pouze přechodový děj magnetického indukčního toku. Nárazový proud je zde popsán pouze graficky, navíc zde nejsou uvedeny způsoby omezení přechodného děje. Matematický popis teoretické hodnoty nárazového proudu a způsoby omezení jsou řešeny v disertační práci Miroslava Nováka, 2003 [2] a jsou zde i uvedeny metody omezení nárazového proudu.

Pro návrh a realizaci omezovače nárazového proudu jsem vyšel z konstrukce popsané v odborném časopise Amatérského rádia. Schéma tohoto obvodu je na obr. 20. Praktickým ověřením funkce jsem zjistil, že obvod funguje správně a omezuje nárazový proud. Ale vzhledem k tomu, že k zapínání síťového transformátoru docházelo náhodně a tudíž nelze říci, jestli se jednalo o nejnepříznivější přechodové děje, nelze z tohoto měření posoudit, k jak velkému omezení nárazového proudu došlo. Tímto měřením byla posouzena pouze funkčnost daného obvodu. Pro posouzení omezovací účinnosti obvodu by musela jednotlivá měření probíhat za stejných podmínek, tzn. při stejném nejnepříznivějším fázovém úhlu určujícím okamžitou hodnotu sinusového napětí v okamžiku připojení transformátoru.

8 Seznam literatury

- [1] Petrov G. N. Elektrické stroje 1, Úvod - Transformátory. 3. oprav. dopl. vyd. Praha: Academia, 1980. 388 s.
- [2] Novák M. Přechodový děj při zapínání transformátoru, Způsoby omezení zapínacího proudu, disertační práce, Liberec, 2003. 264 s
- [3] Bauer M. Teorie obvodů, skripta, VUT Brno
- [4] Meca P. Amatérské rádio, Omezovač nárazového proudu transformátoru pro výkonové zesilovače, Praha: AMARO spol. s r.o., 4/2002
- [5] URL: <<http://smety.webz.cz/softstart.html>> [cit. 2012-4-4]